

超音波パルス・ドップラー法による 運動負荷時の大血管血流動態の検討

—心房ペースング負荷との対比—

金沢大学医学部小児科学講座（主任：谷口 昂教授）

高 島 章 司

（平成2年5月10日受付）

器質的心疾患を認めない小児を対象に運動負荷及び心房ペースング負荷時の血行動態を検討するために、超音波パルス・ドップラー法を用いて負荷前・負荷中・負荷後の大動脈 (aorta, Ao), 肺動脈 (pulmonary artery, PA) の血流波形を記録し、最高血流速度 (peak flow velocity, PFV), 駆出時間 (ejection time, ET), 及び一回拍出量 (stroke volume, SV) を測定した。運動負荷には、自転車エルゴメーターを用い、安静時心拍数より約50%増加した時点を最大運動負荷時とした。心房ペースング負荷では、安静時より心拍数を10心拍毎に増加させ、房室ブロックをきたさない場合180回/分まで心拍数を増加させた。自転車エルゴメーター負荷群 (A群, n=12例) では心拍数が上昇するに従って PFV, SVともに上昇し、また、負荷後 PFV, SVは低下した。最大負荷時には安静時に比べ、PFVはAoで測定した際には $34.1 \pm 15.6\%$, PAで測定した際には $20.5 \pm 10.0\%$ 増加しており、SVはAoで測定した際には $61.5 \pm 20.3\%$, PAで測定した際には $53.7 \pm 17.5\%$ 増加していた、ペースング負荷群 (B群, n=10例) では負荷中の PFV, SVに有意の変化がなく、SVは心拍数上昇とともに低下する傾向にあった。ETは、両群ともに心拍数が上昇するに従って短縮した。A群の PFV, SVの最大負荷時における増加率をAo, PAにおける測定値と比較すると、PFVの変化はAoでの測定値がPAでの測定値に比べ有意に大きかったが ($p < 0.05$), SVの変化に有意差を認めなかった。A群ではカテコールアミンの変力作用の関与により、心筋収縮力が増強して血流速度が上昇し、その結果SVが増加したが、B群においては心筋収縮力の増強は軽度なためにPFVは上昇せず、またETが短縮したことによりSVが低下したと考えられた。軽度な運動負荷時には、PFVが上昇することによりSVが増加し、かつ心拍数が増加することにより分時拍出量は更に増加する。

Key words pulsed Doppler echocardiography, stroke volume, peak flow velocity, bicycle ergometer, atrial pacing

近年、学校心臓検診の普及により突然死の原因となる不整脈や特発性心筋症が早期に発見されるようになり、また医療技術の飛躍的進歩により複雑心奇形を含めた先天性心疾患の治療成績が向上している。それに伴い検診により“異常あり”と判断された症例や術後症例に対する運動制限の必要性の有無を問われる機会が多くなってきた。その際、心機能を評価する上で安静時の一点のみでなく、負荷を与え心拍数を上昇させ

た状態での心機能指標を得ることが必要となってきた。負荷方法としてはトレッドミル、自転車エルゴメーター、ジャンプ・テスト、ハンド・グリップなどの運動負荷や、血管拡張剤やカテコールアミンなどの薬物負荷が知られているが、その間の血行動態、特に血流速度に関する報告は少ない。また、運動時の一回拍出量については負荷方法、負荷強度、測定方法などの違いにより、増加するとする説¹⁾²⁾や変化しないとする

Abbreviations: Ao, aorta; ET, ejection time; PA, pulmonary artery; PCA, perchloric acid; PFV, peak flow velocity; SV, stroke volume

説³⁾があり未だ定説がない。本研究では、一回拍出量に加え血流速度を非侵襲的に、連続的に、しかも繰り返し測定できる利点をあわせ持った超音波パルス・ドップラー法を用い、自転車エルゴメーター運動負荷及び心房ペースング負荷により心拍数を上昇させ、その間の大動脈及び肺動脈の血流波形を記録し、最高血流速度 (peak flow velocity, PFV)、一回拍出量 (stroke volume, SV)、駆出時間 (ejection time, ET) を測定し、運動負荷及びペースング負荷が大血管の血流動態に及ぼす影響を検討し、またその影響因子として運動負荷時の血漿ノルエピネフリン値を測定した。これらより、負荷に対する SV, PFV の変化について興味ある知見を得たので報告する。

対象および方法

1. 対 象

1. エルゴメーター負荷群 (A群) には胸痛、心雑音等を主訴に受診し、身体所見、胸部レントゲン写真及び超音波心臓ドップラー法を含めた心エコー図検査により器質的心疾患を認めないと判断された小児12例、年齢は11～17歳 (平均年齢13歳1ヶ月)、性別は男8例、女4例である。

2. 心房ペースング負荷群 (B群) には川崎病既往児で、心臓カテーテル検査により器質的心疾患を認めなかった小児10例で、年齢は1～6歳 (平均年齢4歳2ヶ月)、性別は男7例、女3例である。

3. エルゴメーター負荷前後の血漿ノルエピネフリンの測定には、Wolff-Parkinson-White 症候群の女児 (10歳、以下症例Aとする)、川崎病既往の男児 (11歳、以下症例Bとする) および心室性期外収縮の男児 (13歳、以下症例Cとする) の3例で行った。断層心エコー図検査、ドップラー心エコー図検査において3症例ともに器質的心疾患は認められなかった。

II. 記録方法

断層心エコー図を用いて心尖部からの左室長軸断面像より大動脈 (aorta, Ao) を、また傍胸骨部からの右室流出路断面像より肺動脈 (pulmonary artery, PA) を描出して、各々の収縮期における血管径を半月弁直上で計測し、パルス・ドップラーエコーのサンプル・ボリュームを大動脈弁、肺動脈弁直上で各弁口中央付近に設置し、負荷前・負荷中・負荷後の大血管血流パターンを紙送り速度 100mm/秒で記録した。使用した超音波心断層装置およびドップラー装置は、主としてカラー・ドップラー装置 SSD880 (アロカ、東京) 及びドップラー装置 SSH40A (東芝、東京) を用いた。

III. 負荷方法

1. A群では被検者を仰臥位に固定し、安静時での心拍数を心電図より、また Ao, PA における PFV をドップラー心エコー図により求めた後、エルゴメーターを用いて心拍数の増加を目安に運動負荷を行った。すなわち、上体の動揺が軽度で、かつ安定した呼吸状態でペダルを回転できる負荷量より開始し、その後は回転数を増加させることにより負荷量を増やし、心拍数が安静時から約50%増加するまでに負荷を与えた。負荷は2回行い、Ao 及び PA におけるドップラー心エコー図をそれぞれ連続観察した。2回目の負荷は、心拍数及び両者の PFV が安静時の測定値に復した後にいった。

2. B群では静脈麻酔下にペースングカテーテルを大腿静脈より右心房に挿入し Ao 及び PA における負荷前の PFV を求めた後、心房ペースングにより心拍数を10心拍毎増加させた。房室ブロックをきたさない場合最高180回/分まで増加させた。負荷は2回行い、Ao 及び PA におけるドップラー心エコー図をそれぞれ連続観察した。2回目の負荷は、心拍数及び両者の PFV が安静時の測定値に復した後にいった。

IV. 血流波形の測定方法

得られた血流波形より収縮期における PFV, ET および SV を測定した (図1)。超音波周波数を F_0 、ドップラー偏位周波数を F_d 、ドップラー・ビーム入射角度を θ 、生体内音速を C ($\approx 1560\text{m/sec}$) とすると血流速度 V は以下の式で表わせる。

$$V = \frac{C \cdot F_d}{2 \cos \theta \cdot F_0}$$

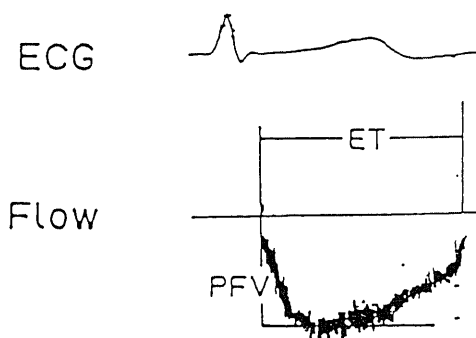


Fig.1. The method of measuring peak flow velocity (PFV) and ejection time (ET). PFV was measured at the midpoint of the darkest portion of the spectrum at the time of maximal flow velocity. The ET was measured from the onset of systolic flow until end-systole as determined by the time at which the curve crossed the O-flow line.

PFV は得られた血流波形のピークのドップラー偏位周波数を測定し上記の式により算出した。SV は流路断面を円形、流速プロフィールを平坦と仮定し流路直径を D (cm) とすると以下の式により算出される。

$$SV = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \frac{C}{2 \cos \theta \cdot Fo} \cdot \int_0^{ET} Fd(t) dt$$

$\int_0^{ET} Fd(t) dt$ はドップラー周波数の全駆出時間についての積分であり、得られた血流波形曲線のほぼ中央をローラープランメーターによりトレースしてその面積を測定することにより求めた。 θ が20度以内の場合には $\cos \theta = 1$ とした。各々の計測値は、連続4～5心拍を平均して求めた。各計測値は平均値±標準偏差値で示した。統計学的処理は student t-test で行い、危険率5%以下を有意とした。

V. ノルエピネフリンの定量法

エルゴメーター負荷前および2回目のエルゴメーター最大負荷時にヘパリン入り採血管で採決し、直ちに4℃で血漿分離した血漿1.0mlに0.5Mトリス塩酸緩衝液(pH 8.6) 2.0mlと活性アルミナ 10mg, dihydroxybenzylamine 250pgを加えて30分間振盪した。静置して上清を吸引除去後、アルミナを蒸留水2.0mlで5回洗浄し、最後に0.1M perchloric acid (PCA) を50μl加えてノルエピネフリンを抽出し、このうち30～40μlをノルエピネフリンの測定に用いた。ノルエピネフリンの測定には、電気化学検出器(Coulcochem, 5100A) (ESA Inc., Massachusetts, U.S.A.)を用いた高速液体クロマトグラフィーLC-5A(島津, 京都)を使用した。移動相には50mM sodium monophosphate, 50mM trichloroacetic acid, 0.02% sodium dodecyl sulfateを含み、水酸化ナトリウムを用い、pHを3.4に調節した後、0.02μmのミリポアフィルターを通し、acetonitrileを15%(V/V)の濃度で加えた。ノルエピネフリンの分離には逆相カラムのSpheri-5 RP-18 (10cm×4.6mm) (Brownless Labs., Santa Clara, U.S.A.)を圧150kg/cm²、流速1500μl/minで用いた。標準物質のnorepinephrine bitartrateは0.1M PCAに溶解して血漿のノルエピネフリン濃度に合わせて加える量を調節した。測定内変動係数は5%以内であった。

成 績

I. 心拍数の変化

A群での最大負荷時の心拍数はAoでの検査時では113±9.4回/分、PAでの検査時では112±9.7回/分であり、またB群での最大負荷時の心拍数はAoでの検査時では158±17.7回/分、PAでの検査時では162±

12.5回/分であった。両群とも最大負荷時の心拍数はAo, PAにおける測定値に有意差はなかった。

II. 自転車エルゴメーター負荷群 (A群)

1. 超音波パルス・ドップラー所見 (図2)

自転車エルゴメーター負荷により心拍数が増加し、それに伴いAo, PA両者におけるPFVは上昇していったが、この上昇の程度はAoでの検査時の方がPAでの検査時に比べ顕著であった。

2. PAの変化 (図3)

Aoでの検査時では、負荷開始直後より心拍数が増加するに従って急激にPFVは上昇していったものが7例、最大負荷前になりPFVが急上昇したものが2例あった。また、負荷後は心拍数の減少とともにPFVは減少していったが、負荷終了直後のPFVが最大負荷時より更に上昇したものが4例に認められた。各症例により安静時の心拍数が異なっていたため、負荷前のPFVに対する最大負荷時のPFVの変化率を各症例で検討したところ34.1±15.6%増加していた。次に、PAでの検査時ではAoにおけると同様心拍数の増加に伴いPFVは上昇したが、急上昇した例はAoでの検査時に比べ少なかった。また、負荷後はPFVが漸減したが、負荷直後にPFVが上昇した例はAoでの測定時より少なく、その変化もわずかであった。負荷前のPFVに対する最大負荷時のPFVの変化率は20.5±10.0%であった。このPFVの変化率をAo, PAにおいての測定値と比較すると、Aoでの検査時の方がPAでの検査時に比べ有意に大きかった($p < 0.05$) (図4)

3. SVの変化 (図5)

Ao, PAで計測したSVは、両者ともに負荷開始後より心拍数が増加するに従って増加していき、最大負荷後は心拍数が減少するに従ってSVは減少していった。負荷前のSVに対する最大負荷時のSVの変化率はAoで測定した場合61.5±20.3%、PAで測定した場合53.7±17.5%増加しており、この増加率はAo, PAで計測したSV間に有意差は認められなかった(図4)。

4. ETの変化 (図6)

同程度の心拍数におけるETをまとめて示してあるが、ETは心拍数の上昇に伴い短縮していったが、Aoで測定したETはPAで測定したETに比べ短い傾向にあった。

III. 心房ペースティング負荷群 (B群)

1. 超音波パルス・ドップラー所見 (図2)

ペースティング負荷では、心拍数が増加してもAo, PAで測定したPFVに明らかな変化は認められな

かった。

2. PFV の変化 (図7)

Ao, PA において測定した PFV は負荷前・負荷中でわずかな変動はあるものの, A群で認められたような PFV の明らかな増加は認められなかった。即ち, 安静時より心拍数が約50%増加した時点においても

PFV は増加せず, 最大負荷時には負荷前に比べ PFV は減少する傾向にあった。

3. SV の変化 (図8)

Ao, PA において測定した SV は, ペーシング負荷した際の PFV 同様に増加せず, 両者はいずれも心拍数上昇とともに減少する傾向にあった。

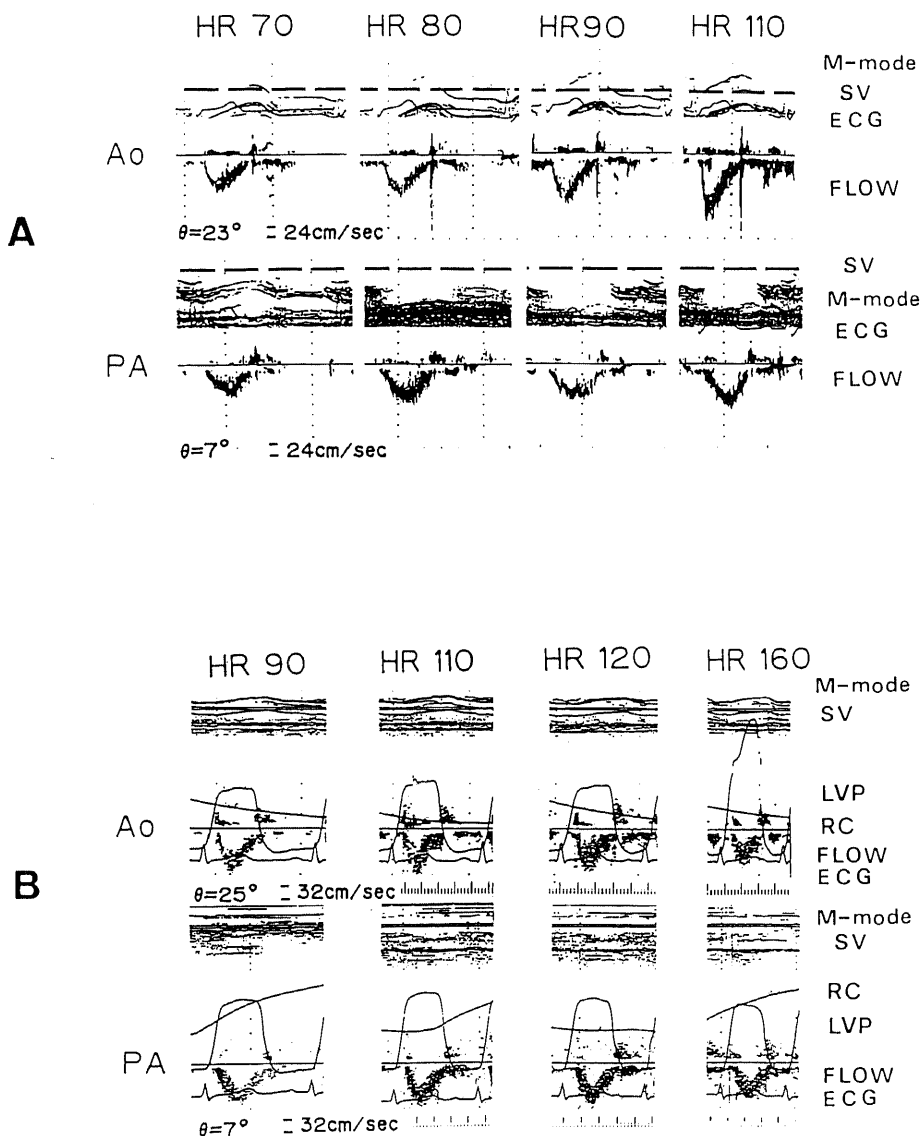


Fig. 2. Pulsed Doppler echocardiographic profile of the great arteries during bicycle ergometer (A) and atrial pacing (B). θ was the angle between the ultrasound beam axis and the axial vector of blood flow. Ao, aorta; PA, pulmonary artery; HR, heart rate; M-mode, M-mode echocardiogram; SV, sample volume; ECG, electrocardiogram; FLOW, Doppler flow velocity pattern; LVP, left ventricular pressure; RC, respiratory curve.

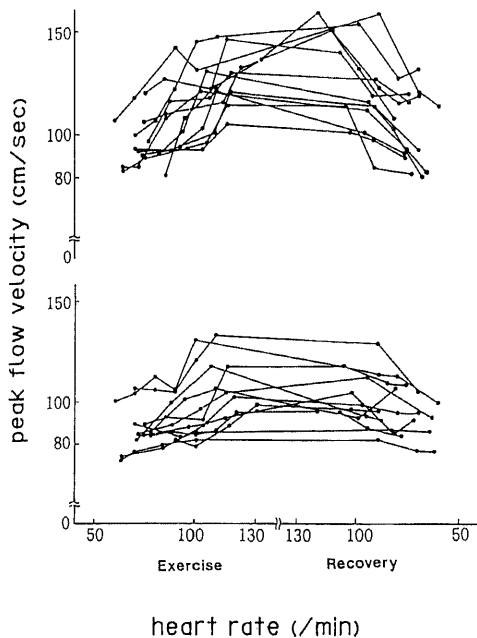


Fig. 3. The relation between peak flow velocity and heart rate during bicycle ergometer in aorta (upper) and pulmonary artery (lower) in 12 children. Results at rest, during and post exercise were connected for each case.

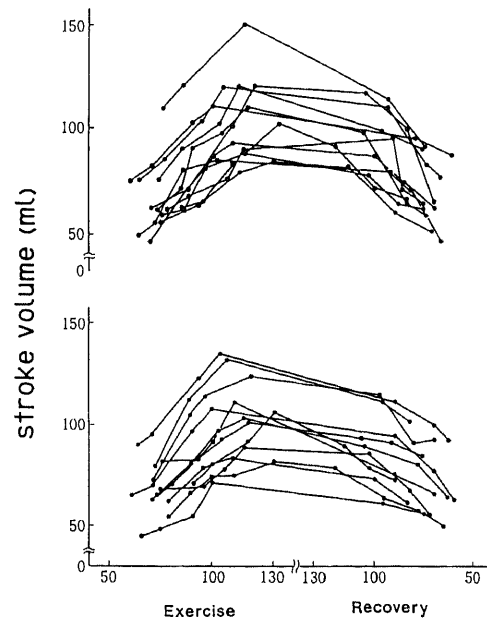


Fig. 5. The relation between stroke volume and heart rate in aorta (upper) and pulmonary artery (lower) during bicycle ergometer and recovery in 12 children. Results at rest, during and post exercise were connected for each case.

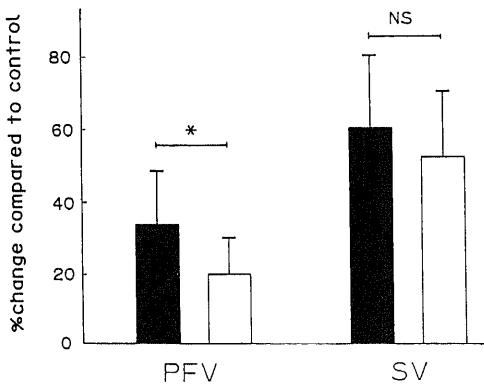


Fig. 4. Percent change of peak flow velocity (PFV) and stroke volume (SV) at peak exercise from control in aorta and pulmonary artery. The percent change of parameters between rest and peak exercise was calculated as: $[(\text{exercise value} - \text{control value}) / \text{control value}] \times 100\%$. The data are expressed as mean \pm S.D.. *, $p < 0.05$; NS, not significant; ■, aorta; □, pulmonary artery.

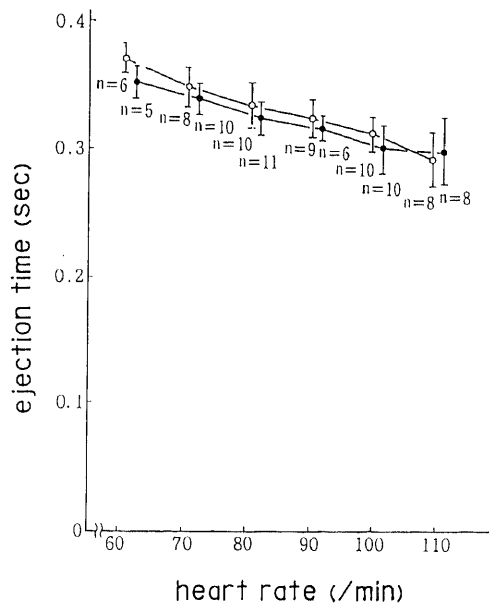


Fig. 6. The relation between ejection time and heart rate in aorta (●) and pulmonary artery (○) during bicycle ergometer exercise.

IV. 運動負荷前後の血漿ノルエピネフリンと PFV の関係

症例 A では負荷前の血漿ノルエピネフリンは 338pg/ml と正常域にあったものが、最大負荷後には 1117pg/ml と約 3 倍の増加を示した。また、負荷前及び最大負荷時には、PA での PFV は 110.7cm/sec であったものが 148.2cm/sec、Ao での PFV は 120cm/sec であったものが 185.7cm/sec と速くなっていた (図 9-A)。症例 B では負荷前の血漿ノルエピネフリンは 129pg/ml と正常域にあったが、最大負荷後には 507pg/ml と軽度上昇した。また、負荷前および最大負荷時は PA での PFV は 92.9cm/sec であったものが 130cm/sec、Ao での PFV は 138cm/sec であったものが 180cm/sec と速くなっていた (図 9-B)。また症例 C では検査に対する不安のために緊張状態が強く負荷前より血漿ノルエピネフリンは 659pg/ml とよりやや高い状態にあり、また最大負荷後には 787pg/ml と明らかな増加を示さなかった。また、Ao, PA での PFV にも大きな変化は認められなかった (図 9-C)。

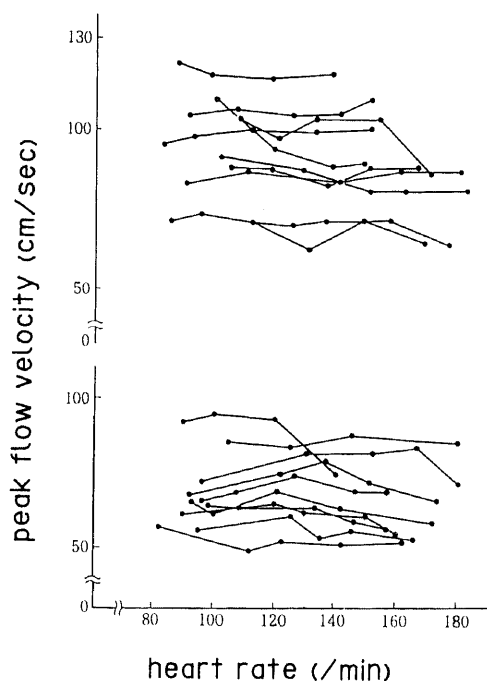


Fig. 7. The relation between peak flow velocity and heart rate in aorta (upper) and pulmonary artery (lower) during atrial pacing in 10 patients with past history of Kawasaki disease. Results at rest and during atrial pacing were connected for each patient.

考 察

運動時における SV に関して多くの報告がなされているが負荷方法、運動強度、負荷時の体位 (立位、坐位、臥位)、測定方法などの違いにより様々な説が述べられている。負荷方法としては、階段昇降⁴⁻⁶⁾、自転車エルゴメーター⁷⁻⁹⁾、トレッドミル^{10,11)}、ハンド・グリップ^{12,13)}などが用いられており、最大負荷時の設定は心拍数の増加率¹⁴⁾、運動負荷時間¹⁵⁾、被験者の自覚症状¹⁶⁾、酸素消費量¹⁷⁾などによってなされている。また、Fick 法¹⁸⁾、標識希釈法¹⁾、熱希釈法¹⁹⁾、心エコー法²⁰⁾など様々な方法により SV あるいは心拍出量が測定されており、従って報告者によりいろいろな説が述べられている。Thadani ら¹⁾は仰臥位での自転車エルゴメーター負荷により心拍数を安静時 73±4 回/分より 128±6 回/分まで増加させた時の一回拍出係数を熱希釈法を用いて測定し、安静時 50.5±5 ml/回/m²より最大負荷時には 61±6 ml/回/m²上昇したと報告している。また、Wang ら²⁰⁾は標識希釈法によりトレッドミル負荷で軽度ないし中等度の負荷を与え、一回拍出係数平

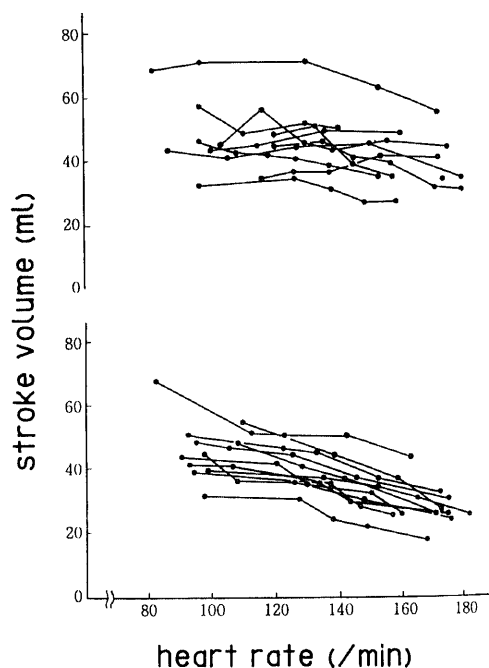


Fig. 8. The relation between stroke volume and heart rate in aorta and pulmonary artery during atrial pacing in 10 patients with past history of Kawasaki disease. Results at rest and during atrial pacing were connected for each patient.

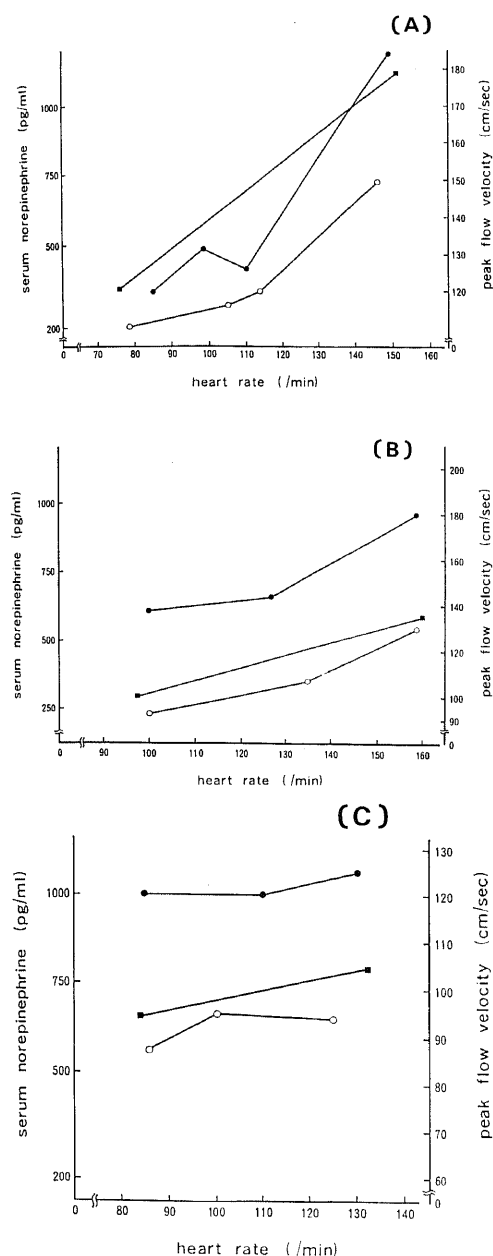


Fig. 9. Changes in heart rate, peak flow velocity and serum norepinephrine (NE) concentration during exercise by bicycle ergometer in a 10 year old girl with Wolff-Parkinson-White syndrome (A), a 11 year old boy with past history of Kawasaki disease (B), and a 13 year old boy with premature ventricular complexes (C). None of three had organic heart disease. The measurements of NE concentration were performed at rest and peak exercise. ●, aorta; ○, pulmonary artery; ■, norepinephrine.

均が安静時 32ml/回/m²より最大負荷時には 57ml/回/m²に増加したと述べている。Rushmer ら²³はトレッドミル負荷では SV が一定であったと報告しており、また Gardin ら²⁴は仰臥位エルゴメーター負荷を行い安静時平均心拍数69回/分より最大負荷時平均心拍数159回/分までに増加させ、超音波パルス・ドップラー法により SV を測定し、SV は最大負荷時には減少し、心拍数が増加することにより分時拍出量が増加したと報告している。一方、Stenberg ら²⁵は下肢のみ、あるいは上下肢を用いて荷重を処理する軽度な運動では SV は上昇し、同荷重を上肢のみで行う強度な運動になると SV は逆に低下したと述べている。以上のように様々な説があり、運動時の SV に関しては定説がないようである。

本研究では超音波パルス・ドップラー法を用いて運動負荷前・負荷中・負荷後の SV を測定した。超音波パルス・ドップラー法は1956年里村ら²⁶によって最初の装置が開発され、その後臨床の場で応用されている。その原理は超音波短触子から送信された超音波が血管内を流れる血球によって散乱され、散乱超音波の一部が再び元の超音波短触子で受信されるが、この際血球の流速に応じてドップラー効果により周波数に変化して受信される。この周波数の変化、即ち偏位周波数を連続して記録するのが超音波パルス・ドップラー法である。偏位周波数は血流速度に比例し、また血球が短触子に近づく場合は正の値、遠ざかる場合には負の値となり、従って、血流速度および血流の方向を知ることができる。また、流路内を通過する血流量は流速時間積分として求められる流体の移動距離と流路断面面積の積として算出されることから、断層心エコー図より求めた流路断面面積と超音波ドップラー法による流速の計測により一回拍出量が求められる。これまで本法と熱希釈法や Fick 法による心拍出量の比較検討などにより、本法の一回拍出量の妥当性が報告されている^{24)~28)}。超音波ドップラー法は血流動態を連続して観察でき、また非侵襲的で繰り返し行える利点があるため、本研究では本法により PFV, SV を測定した。

超音波パルス・ドップラー法により SV を測定する際には、血流速波形と基線との間に囲まれた領域の面積をプランメーターやディジタイザーを用いて計測するが、この面積の大小に影響するものは(1)最高血流速度、(2)駆出時間、(3)血流速波形の形(例えば円錐形かドーム形かといったちがいが)があげられる。本研究では、運動負荷により血流速波形の形に明らかな変化は認めなかったが、Ao, PA で計測した PFV は上昇し、ET が減少し SV は増加していった。即ち、ET

が短縮し血流速度波形と基線に囲まれた領域の面積が縮小する以上に、PFV 増加に伴う面積増加が大きかったためと思われる。

一方、心房ペースング負荷群においては Ao, PA において計測した PFV は上昇しなかったために SV の増加が認められず、心拍数上昇に伴い ET が短縮したために、SV は低下傾向にあったものと推察された。

Wallmeyer ら²⁰は動物実験において $5 \mu\text{g/kg/min}$ のドブタミン負荷を行い、対照に比べ上行大動脈の PFV が上昇したと報告している。Ihlen ら²⁰は、冠動脈病変を伴った患者にドブタミン負荷を行い SV が増加したと報告している。また、本研究における運動負荷前後の PFV とノルエピネフリンの比較検討では PFV の上昇が顕著なほどノルエピネフリンの増加も大きい傾向にあった。Erickson ら²⁰は運動負荷中には左室拡張末期径が増加し、これにより Frank-Starling の法則にのっとり心筋の収縮性が高まり、SV の増加につながるとしている。これらのことにより、運動負荷時には交感神経末端より遊離された内因性カテコールアミンの変力作用や Frank-Starling 機構などの関与により心筋収縮力が増強して PFV が上昇し、その結果 SV が増加すると考えられた。また、この SV の増加には個体差があり、その原因のひとつとして運動に反応して増加するカテコールアミンの大小が関係していることが本研究より示唆された。一方、心房ペースング負荷では Bowditch 効果として知られる心筋収縮力の増強があるが運動負荷時の心筋収縮力増強に比べ軽度なため血流速度に対する影響が少なく、SV は減少したものと考えられた。Stenberg ら²⁰は、軽度な運動により SV は増加するとしており、Thadani ら²⁰は安静時平均心拍数 73/分より最大負荷時平均心拍数 128/分となるような軽度の運動負荷を行い SV が有意に増加したと報告している。今回の検討では、心拍数が安静時より約 50% 増加するまでの血流動態を観察したが、負荷の程度は比較的軽度なものであり運動負荷により SV の増加を認め、Stenberg や Thadani らの説を支持する結果となった。

一方、Gardin ら²⁰は仰臥位エルゴメーター負荷により平均心拍数を 69 回/分より 159 回/分 (130% 増) まで上昇させ、SV が低下したと報告しており、Stenberg ら²⁰は強度な運動になると SV が低下すると報告している。心房ペースング負荷群では負荷中 SV は変動せず、最大負荷時には減少する傾向にあり、この所見は強度な運動時の SV の変化とほぼ同様な結果となった。運動負荷が高度な場合には、分時拍出量の増大は、心拍数を増大させることのみによりなされている

ことが示唆された。即ち、負荷方法および負荷の程度により血流動態は様々な変化が生ずるものと思われる。Ao, PA で測定した PFV は共に運動負荷により上昇したが、その変化は Ao における測定値が PA における測定値に比べ有意に大きかった。しかし、Ao で測定した SV と PA で測定した SV の変化に有意差は認められなかった。これは正常者の場合においても安静時、Ao で測定した PFV は PA で測定した PFV に比べ速いことが、多くの報告で認められている^{20,21}。これに対して肺体血流量比が 1 となる理由として左心室よりも右心室の ET が長く、血流速度波形が Ao では円錐形、PA ではドーム形を呈していることが考えられる。

運動負荷中の心エコー検査には種々の問題点がある。①体動によりトランスデューサーの固定が得られにくい②過呼吸のために肺が拡張し、エコービームが吸収されて明瞭な心エコー図が得られにくい③血管径の測定誤差、などである。これらの問題に対しては負荷を軽度にし、また負荷を徐々に増大させることにより体動や過呼吸を最大負荷前まで軽度に抑えることができる。血管径の測定に際しては 1mm の誤差が断面積で約 15% の誤差となるために充分留意すべきである。Ao で計測した SV と PA で計測した SV は理論的には一致するはずであるが、今回の検定では負荷前・負荷中・負荷後といずれにおいても一致していなかった。その原因としては、血管径の測定に誤差が生じた可能性が高いと思われる。しかしながら、Ao, PA で求めたそれぞれの SV に有意差はなく、今回の SV の計測が妥当なものであったと考えられた。

今回負荷中の大血管径の測定は行わなかったが、Ihlen ら²⁰はドブタミン負荷前後で分時拍出量は増加したが、大動脈径に差がなかったと報告しており、運動中の SV 測定にあたり、安静時の血管径を用いることが可能と考えられた。仰臥位エルゴメーター負荷を行い、超音波パルス・ドップラー法により血行動態を検討した結果、軽度な運動では PFV が増加することにより SV が増加し、かつ心拍数が増加することにより分時拍出量は更に増大すると考えられる。

結 果

自転車エルゴメーターおよび心房ペースング負荷により心拍数を上昇させ、その間の大血管血流動態を超音波パルス・ドップラー法を用いて検討し、以下の成績を得た。

1. 自転車エルゴメーター運動負荷中には心拍数の上昇に伴って大血管の血流速度が上昇し、一回拍出量

の増加が認められる。

2. 運動負荷による大血管血流速度の上昇は、大動脈での変化が肺動脈での変化より顕著である。

3. 心房ペースティング負荷中には大血管血流速度は変化せず、駆出時間が短くなるために一回拍出量は低下する傾向にある。

4. 運動負荷による血漿ノルエピネフリンの変動は一様でなかったが、運動負荷時の大血管血流速度の増加は内因性カテコールアミンの上昇に起因する事が示唆される。

5. 軽度な運動負荷により分時拍出量は血流速度が上昇することにより一回拍出量が増大し、心拍数が増加することにより更に増加する。

謝 辞

稿を終えるに臨み、御指導と御校閲を賜りました恩師谷口昂教授に深謝し、併せて御教示を仰ぎました佐藤保助教授に厚く感謝の意を表わします。また、終始研究に御協力頂きました小児科心臓グループの諸先生方に感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費「No.61770647」に拠るものである。

文 献

- 1) Thadani, U. & Parker, J. O.: Hemodynamics at rest and during supine and sitting bicycle exercise in normal subjects. *Am. J. Cardiol.*, **41**, 52-59 (1978).
- 2) Daley, P. J., Sagar, K. B. & Wann, L. S.: Doppler echocardiographic measurement of flow velocity in the ascending aorta during supine and upright exercise. *Br. Heart J.* **54**, 562-567 (1985).
- 3) Rushmer, R. F.: Constancy of stroke volume in ventricular responses to exertion. *Am. J. Physiol.*, **196**, 745-750 (1959).
- 4) Master, A. M., Nuzie, E. S., Brown, R. C. & Parker, R. C.: The electrocardiogram and the "two-step" exercise. A test of cardiac function and coronary insufficiency. *Am. J. Med. Sci.*, **207**, 435-450 (1944).
- 5) Ford, A. B. & Hellerstein, H. K.: Energy cost of the Master two-step test. *J. A. M. A.*, **164**, 1868-1874 (1957).
- 6) Rowell, L. B., Taylor, H. L., Simonson, E. & Carlson, W. S.: The physiologic fallacy of adjusting for body weight in performance of the Master two-step test. *Am. Heart J.*, **70**, 461-465 (1965).
- 7) Adams, F. H. & Duffie, E. R.: Physical working capacity of children with heart disease. *Lancet*, **1**, 493-496 (1961).
- 8) Duffie, E. R., Jr. & Adams, F. H.: The use of the working capacity test in the evaluation of children with congenital heart disease. *Pediatrics*, **32**, 757-768 (1963).
- 9) Goldberg, S. J., Weiss, R., Kaplan, E. & Adams, F. H.: A comparison of the maximal endurance of normal children and patients with congenital cardiac disease. *J. Pediatr.*, **69**, 46-55 (1966).
- 10) Bruce, R. A.: Methods of exercise testing step test, bicycle, treadmill stress testing. *Am. J. Cardiol.*, **33**, 715-720 (1974).
- 11) Pollock, M. L., Bohannon, R. L., Cooper, K. H., Ayres, J. J., Ward, A., White, S. R. & Linn erud, A. C.: A comparative analysis of four protocols for maximal treadmill stress testing. *Am. Heart J.*, **92**, 39-49 (1976).
- 12) Tuttle, W. W. & Horvath, S. M.: Comparison of effect of static and dynamic work on blood pressure and heart rate. *J. Appl. Physiol.*, **10**, 294-296 (1957).
- 13) 佐藤 登, 中津忠則, 松岡 優, 植田秀信, 宮尾 益英: 運動時における1回拍出量の検討. *小児科臨床*, **35**, 1063-1068 (1982).
- 14) Sheffield, L. H. & Roitman, D.: Stress testing methodology. *Prog. Cardiovasc. Dis.*, **19**, 33-49 (1976).
- 15) 高山和久, 高橋郁美, 河野敏彦, 原 正忠, 照屋日出夫, 中山信彦, 中塚喬之, 古幡 博, 吉村正蔵: 超音波パルス・ドップラー血流量計による連続的心拍出量の研究: 自転車エルゴメーター運動負荷応答の測定. *J. Cardiogr.*, **14**, 833-840 (1984).
- 16) Weiss, J. L., Weisfeldt, M. L., Mason, S. J., Garrison, J. B., Livengood, S. V. & Fortuin, N. J.: Evidence of Frank-Starling effect in man during severe semisupine exercise. *Circulation*, **59**, 655-661 (1979).
- 17) Lock, J. E., Einzing, S. & Moller, J. H.: Hemodynamic responses to exercise in normal children. *Am. J. Cardiol.*, **41**, 1278-1284 (1978).
- 18) Bevegard, S., Freyschuss, U. & Strandell, T.: Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position. *J. Appl. Physiol.*

ol., 21, 37-46 (1966).

- 19) Bayliss, J. Anoson, R. C., Norell, M. S., Wilson, P. P. & Sutton, G.: Vasodilatation with captopril and prazosin in chronic heart failure; double blind study at rest and on exercise. *Br. Heart J.*, 55, 265-273 (1986).
- 20) Wang, Y., Marshall, R. J. & Shepherd, J. T.: The effect of changes in posture and graded exercise on stroke volume in man. *J. Clin. Invest.*, 39, 1051-1061 (1960).
- 21) Gardin, J. M., Kozlowski, J., Dabestani, A., Murphy, M., Kusnick, C., Allie, A., Russell, D. & Henry, W. L.: Studies of Doppler aortic flow velocity during supine bicycle exercise. *Am. J. Cardiol.*, 57, 327-332 (1986).
- 22) Stenberg, J., Astrand, P., Ekblom, B., Royce, J. & Saltin, B.: Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine. *J. Appl. Physiol.*, 22, 61-70 (1967).
- 23) 里村茂夫: 超音波ドプラー法による心臓機能検査の研究 (第1報) ドプラー法の原理 (第2報) 装置. *日循誌*, 20, 227-228 (1956).
- 24) Goldberg, S. J., Sahn, D. J., Allen, H. D., Valdes-Cruz, L. M., Hoenecke, H. & Carnahan Y.: Evaluation of pulmonary and systemic flow by 2-dimensional Doppler echocardiography using fast Fourier transform spectral analysis. *Am. J. Cardiol.*, 50, 1934-1400 (1982).
- 25) Magnin, P. A., Stewart, J. A., Myers, S., Ramm, O. & Kisslo, J. A.: Combined Doppler and phased-array echocardiographic estimation of cardiac output. *Circulation*, 63, 388-392 (1981).
- 26) Lewis, J. F., Kuo, L. C., Nelson, J. G., Limacher, M. C. & Quinones, M. A.: Pulsed Doppler echocardiographic determination of stroke volume and cardiac output: Clinical validation of two-methods using the apical window. *Circulation*, 70, 425-431 (1984).
- 27) Sanders, S. P., Yeager, S. & Williams, R. G.: Measurement of systemic and pulmonary blood flow and Qp/Qs ratio using Doppler and two-dimensional echocardiography. *Am. J. Cardiol.*, 51, 952-956 (1983).
- 28) 桑子賢司, 佐久間徹, 松田光生, 関口達彦, 杉下靖郎, 伊藤 巖: 断層心エコー・ドプラー法による心拍出量測定を試み: 肺動脈基部サンプリング法. *J. Cardiogr.*, 14, 841-850 (1984).
- 29) Wallmeyer, K., Wann, L. S., Sagar, K. B., Kalbfleisch, J. & Klopfenstein, H. S.: The influence of preload and heart rate on Doppler echocardiographic indexes of left ventricular performance: comparison with invasive indexes in an experimental preparation. *Circulation*, 74, 181-186 (1986).
- 30) Ihlen, H., Myhre, E., Amlie, J. P., Forfang, K. & Larsen, S.: Changes in left ventricular stroke volume measured by Doppler echocardiography. *Br. Heart J.*, 54, 378-383 (1985).
- 31) Erickson, H. H., Bishop, V. S., Kardon, M. B. & Horwitz, L. D.: Left ventricular internal diameter and cardiac function during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 30, 473-478 (1971).
- 32) 中谷茂和, 谷口 昂, 新垣義夫, 神谷哲郎: 超音波パルス・ドプラー法による小児の心室流入路流出路血流像の検討. *日児誌*, 90, 2039-2048 (1986).
- 33) Gardin, J. M., Burn, C. S., Childs, W. J. & Henry, W. L.: Evaluation of blood flow velocity in the ascending aorta and main pulmonary artery of normal subjects by Doppler echocardiography. *Am. Heart J.*, 107, 310-319 (1984).
- 34) Ihlen, H., Amlie, J. P., Dale, J., Forfang, K., Nitter-Hauge, S., Otterstad, J. E., Simonson, S. & Myhre, E.: Determination of cardiac output by Doppler echocardiography. *Br. Heart J.*, 51, 54-60 (1984).

Comparative Study on Cardiac Hemodynamics During Exercise with Atrial Pacing by Pulsed Doppler Echocardiography Shoji Takabatake, Department of Pediatrics, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920—J. Jusen Med. Soc., 99, 479—489 (1990)

Key words pulsed Doppler echocardiography, peak flow velocity, stroke volume, bicycle ergometer, atrial pacing

Abstract

Using pulsed Doppler echocardiography, hemodynamic responses to exercise and atrial pacing were examined in 22 children without cardiovascular disease. Cardiac response was evaluated by the following parameters: peak flow velocity (PFV), ejection time (ET) and stroke volume (SV). A bicycle ergometer was used as exercise loading, and was continued until there was an increase in heart rate by 50% from the resting beat. In atrial pacing, the pacing rate was increased up to 180 beats/min by 10 beat gradations, or up to the rate producing AV block. During exercise (group A, $n=12$), PFV and SV rose in parallel to the heart rate and dropped after stopping exercise; PFV increased by $34.1 \pm 15.6\%$ in the aorta (Ao) and $20.5 \pm 10.0\%$ in the pulmonary artery (PA), and SV also rose by $61.5 \pm 20.3\%$ in Ao and $53.7 \pm 17.5\%$ in PA at the peak of exercise. In contrast, during atrial pacing (group B, $n=10$), an increase in the heart rate was not associated with a change in PFV, and SV tended to decrease. The ET was shortened in both groups. PFV changes in group A were greater in Ao than PA ($p<0.05$), but changes in SV were not significantly different. The increase in SV during exercise appeared to be due to a rise in PFV induced by the inotropic action of catecholamine on myocardial contractility. In contrast, SV was decreased during atrial pacing, because no chronotropic effect was exerted on PFV, and the ET was shortened. It is concluded that during exercise, cardiac output is increased by the concomitant elevation of heart rate and SV, and the SV increase is partially caused by the rise in PFV.